

30. Erb A. BaZrO₃: the solution for the crucible corrosion problem during the single crystal growth of high-*T_c* superconductors REBa₂Cu₃O_{7-δ}; RE = Y, Pr / Erb A., Walker E., Flukiger R. // *Physica C*. — 1995. — V. 245. — P. 245–251.

31. Schneemeyer L.F. Superconductivity in YBa₂Cu₃O₇ single crystals / Schneemeyer L.F., Waszczak J.V., Siegrist T., Van Dover R.B., Rupp L.W., Batlogg B., Cava R.J., Murphy D.W. // *Nature* (London). — 1987. — V. 328. — P. 601–603.

32. Mizokawa T. Angle-resolved photoemission study of insulating and metallic Cu-O chains in PrBa₂Cu₃O₇ and PrBa₂Cu₄O₈ / Mizokawa T., Kim C., Shen Z.X., Ino A., Yoshida T, Fujimori A, Goto M., Eisaki H. // *Phys Rev Lett*. — 2000. — V. 85. — P. 4779–4782.

33. Shiohara Y. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths / Ed. by K.A. Gschneider, L. Eyring, M.B. / Shiohara Y., Goodilin E.A. // *Maple. Amsterdam: Elsevier Science*. — 2000. — V. 30. — P. 67–221.

Надійшла до редколегії 27.05.2011.

© Войтенко Т.А., 2012

УДК 546.64'43'65'56'21+538.945

Н.В. Маркова, В.В. Приседский (ДонНТУ)

СЛАБО СВЯЗАННЫЙ КИСЛОРОД В КУПРАТЕ БАРИЯ–ИТТРИЯ, НЕСТЕХИОМЕТРИЧНОМ ПО КАТИОНАМ И ЛЕГИРОВАННОМ Nd, Sm И Gd

Твердофазным методом синтезированы керамические образцы состава Y_{1+y}Ba_{2-y}Cu₃O_x и YBa_{2-y}R_yCu₃O_x (R = Nd, Sm, Gd). Определены области гомогенности изучаемых купратов, нестехиометричных по соотношению крупных катионов в узлах Y и Ba. Впервые выявлено наличие в купрате бария-иттрия, нестехиометричном по катионам, дополнительной составляющей кислородной нестехиометрии, которая отличается от обычно наблюдаемой в сверхпроводниковых купратах значительно большей скоростью релаксации. Установлены параметры кинетики релаксации кислородной нестехиометрии в процессах изотермического окисления и восстановления образцов.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, купрат, кислородная нестехиометрия, редкоземельный элемент, слабо связанный кислород.

Твердофазным методом синтезовано керамічні зразки складу Y_{1+y}Ba_{2-y}Cu₃O_x і YBa_{2-y}R_yCu₃O_x (R = Nd, Sm, Gd). Визначено області гомогенності купратів, що вивчаються, нестехіометричних за співвідношенням крупних катіонів у вузлах Y і Ba. Вперше виявлено наявність в купраті барію-ітрію, який нестехіометричний за катіонами, додаткової складової кисневої нестехіометрії, яка відрізняється від зазвичай спостережуваною в надпровідникових купратах значно більшою швидкістю релаксації. Встановлено параметри кінетики релаксації кисневої нестехіометрії в процесах ізотермічного окиснення і відновлення зразків.

Ключові слова: високотемпературна надпровідність, купрат, киснева нестехіометрія, рідкоземельний елемент, слабо зв'язаний кисень.

Особенностью оксидных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе купратов является значительная кислородная нестехиометрия и ее влияние на структуру и электрофизические свойства [1–2]. В зависимости от температуры и парциального давления кислорода индекс *x* в купрате бария-иттрия YBa₂Cu₃O_{*x*} (YBCO) изменяется в пределах 6,2 < *x* < 7,0, а в метастабильном состоянии — от 6,0 до 7,0 [3–6]. Было установлено, что общее содержание кислорода в купрате бария-иттрия состоит из прочно связанного

оксидного кислорода (количество которого постоянно и равняется 6,0 моль атомов кислорода на одну формульную единицу YBCO) и ответственного за нестехиометрию слабо связанного кислорода (на долю которого приходится вся переменная часть индекса *x*): *x* = 6,0 + δ [5]. Одним из возможных путей для лучшего понимания высокотемпературной сверхпроводимости является изучение влияния гетеровалентных замещений катионов в структуре RBa₂Cu₃O_{*x*}. Гетеровалентные замещения являются удобным способом влияния на кислородную нестехио-

метрию и структурные параметры в ВТСП соединениях и поэтому могут быть использованы для изучения связи сверхпроводящих свойств, структурных характеристик и химического состава.

К настоящему времени проведено недостаточно исследований кислородной нестехиометрии в образцах сверхпроводящих купратов, которые одновременно нестехиометричны по соотношению катионов. В связи с этим, значительный теоретический и практический интерес представляет изучение кислородной нестехиометрии твердых растворов сверхпроводящих купратов, при гетеровалентных замещениях катионов.

В настоящей работе были проведены исследования равновесного содержания, кинетики релаксации и структурной организации слабосвязанного кислорода в купрате бария-иттрия $YBa_{2-y}R_yCu_3O_x$, легированного гетеровалентными ионами иттрия (вместо Ba), самария, неодима и гадолиния.

Синтез нестехиометрических и легированных образцов проводили методом керамического синтеза (твёрдофазный метод). С целью установления оптимальных условий синтеза были проведены рентгенофазовые исследования шихты («ДРОН-3», CuK_α излучение), которую прокачивали в интервале температур 880–930°C на воздухе в течение различных промежутков времени.

По данным рентгенографии синтез однофазного купрата достигался через 40 часов термообработки при температуре 910–920°C (рис 1).

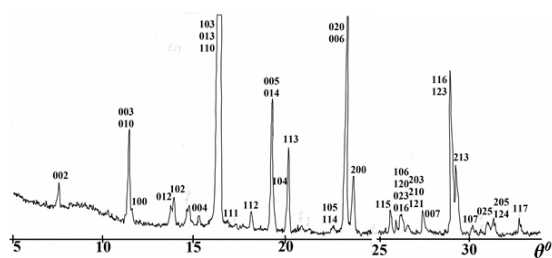


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма однофазного образца $YBa_2Cu_3O_x$ после термообработки при 920°C 40 ч

На дифрактограмме присутствуют пики ромбической фазы $YBa_2Cu_3O_x$, в то время, как пики, отвечающие исходным веществам (Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO) и промежуточным фазам ($BaCuO_2$, Y_2BaCuO_5) отсутствуют.

Для определения предельных составов областей гомогенности нестехиометричных купратов были изучены рентгеновские дифрактограммы синтезированных образцов с различным соотношением компонентов. Обращали внимание на наличие пиков, отвечающим посторонним фазам. Отсутствие дифракционных пиков, отвечающих примесным фазам для образцов купрата бария-иттрия, легированных Nd, Sm, Gd до 10 мол.% свидетельствует о том, что все эти образцы лежат в пределах области гомогенности. На образцах, легированных значительно большими количествами примесных ионов, появлялись пики примесных фаз (рис. 2).

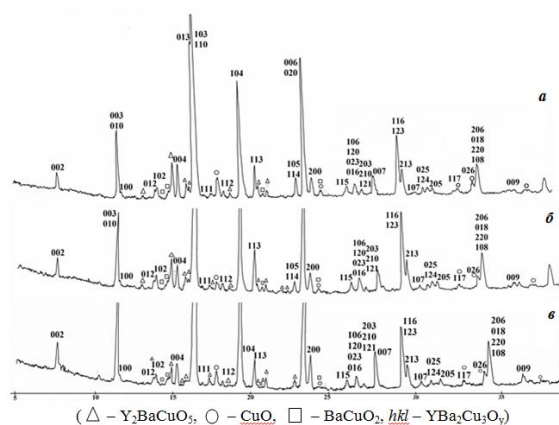


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов $Y_{1+y}Ba_{2-y}Cu_3O_x$ после термообработки при 920°C 40ч. Содержание Y (1 + y): а – 1,30, б – 1,20, в – 1,15

Определение границ областей гомогенности проводили двумя путями: непосредственно по закону Вегарда и методом исчезающей фазы. С целью определения областей гомогенности по закону Вегарда были изучены зависимости параметров кристаллической решетки от концентрации иттрия в образцах (рис. 3).

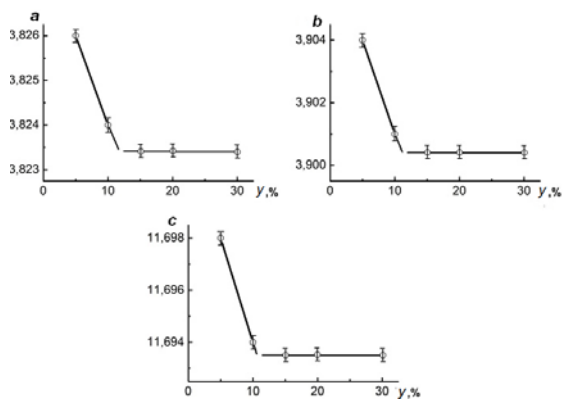


Рис. 3. Зависимость параметров элементарной ячейки (a, b, c) от концентрации иттрия в образцах $Y_{1+y}Ba_{2-y}Cu_3O_x$

Поскольку величины параметров кристаллической решетки в образцах с концентрацией иттрия 15, 20 и 30% не изменяются, в отличие от образцов с концентрацией иттрия 5 и 10%, сделали вывод о том, что предел области гомогенности для купрата бария-иттрия $Y_{1+y}Ba_{2-y}Cu_3O_x$, нестехиометричного по соотношению Y/Ba, лежит в пределах $0,10 < y < 0,15$.

С целью проверки и уточнения предельных составов областей гомогенности для исследуемых купратов, построены зависимости интенсивности пиков посторонних фаз (Y_2BaCuO_5 , CuO, $BaCuO_2$) от концентрации иттрия (рис. 4).

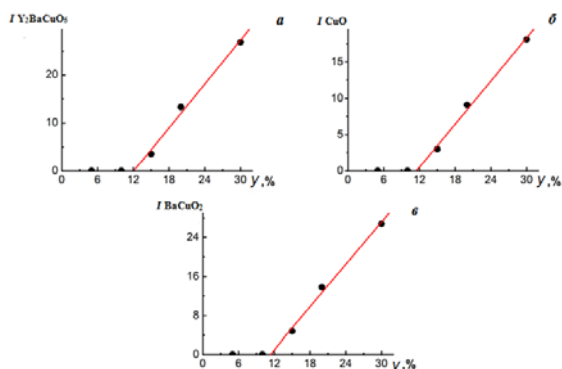


Рис. 4. Зависимости интенсивности пиков посторонних фаз (а – Y_2BaCuO_5 , б – CuO, в – $BaCuO_2$) от концентрации иттрия у

Наклонные прямолинейные зависимости содержания вторых фаз (Y_2BaCuO_5 , CuO, $BaCuO_2$) от катионной нестехиометрии у пересекают

ось абсцисс в одной и той же точке при $y = 0,12$. Исходя из построенных графиков, можно сделать вывод, что для купрата бария-иттрия $Y_{1+y}Ba_{2-y}Cu_3O_x$, область гомогенности лежит в пределах $0 \leq y \leq 0,12$. Такой же результат был найден для предельного состава области нестехиометрии твердых растворов $YBa_{2-y}R_yCu_3O_x$.

Следующим этапом было изучение особенностей кислородной нестехиометрии в процессах изотермического окисления и восстановления легированных купратов методом термогравиметрии.

На рис. 5 показана зависимость содержания кислорода x от температуры T, полученная для нелегированного образца на воздухе.

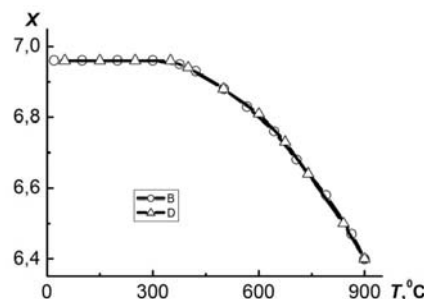


Рис. 5. Зависимость содержания кислорода x от температуры T при нагреве (кривая B) и охлаждении (кривая D) нелегированного образца $YBa_2Cu_3O_x$ на воздухе

Содержание кислорода уменьшается, начиная с 400°C. Для нестехиометричных по катионам и легированных образцов наблюдается необычное по сравнению с нелегированным купратом смещение кривых «нагревание–охлаждение», зависящее от температуры и времени изотермических выдержек.

На рис. 6 показаны кривые охлаждения легированных образцов. При быстром охлаждении содержание кислорода x изменяется по кривой B, которая практически полностью совпадает с кривой для нелегированного образца.

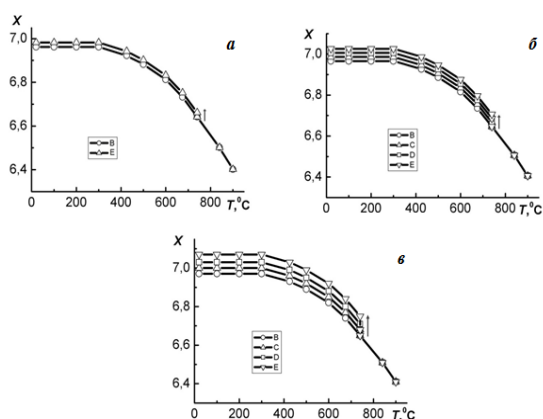


Рис. 6. Зависимость содержания кислорода при охлаждении образцов $\text{YBa}_{2-y}\text{Nd}_y\text{Cu}_3\text{O}_x$ ($y=0,02$ (а), $y=0,06$ (б), $y=0,1$ (е)). Выдержка в течение: В – 1 мин., С – 1 час. D – 10 час. E – 24 час

Содержание кислорода изменяется по той же кривой В при охлаждении образцов от 900°C до 740°C . Картина меняется при медленном охлаждении до граничной температуры $T_{\text{гр}1} = 740^\circ\text{C}$. При этой и меньших температурах наблюдается смещение от кривой В за счет дополнительного медленного окисления образцов $\Delta x = \gamma$. Максимальное дополнительное окисление при 740°C достигается за время порядка 24 ч, т.е. значительно, на порядки величины большее, чем для обычного слабо связанного кислорода.

Для всех исследуемых образцов максимальная величина дополнительной нестехиометрии по O_2 совпадает с мольным количеством введенного РЗЭ ($\gamma_{\text{max}} = y$).

При быстрых нагревах (рис. 7) до 840°C образцы изменяют содержание кислорода по кривой В. Картина меняется при нагреве до граничной температуры 840°C . При этой и больших температурах наблюдается смещение от кривой В за счет дополнительного медленного восстановления образцов. Полное восстановление при 840°C достигается за время порядка 3 ч (кривая D).

Полученные результаты свидетельствуют о существовании в легированных образцах дополнительной кислородной нестехиометрии, которая отличается от обычно наблюдаемой в нелегированных образцах скоростью установления нового значения содержания кислорода после изменения термодинамических параметров. В таких образцах можно говорить о двух составляющих слабо связанного нестехиометрического кислорода: обычной «быстрой» δ и дополнительной «медленной» γ . Тогда общее содержание кислорода в легированном купрате можно представить такой формулой: $x = 6 + \delta + \gamma$.

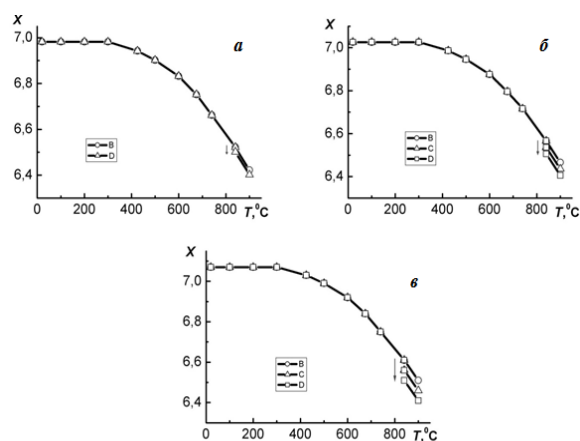


Рис. 7. Зависимость содержания кислорода при нагреве образцов $\text{YBa}_{2-y}\text{Sm}_y\text{Cu}_3\text{O}_x$ ($y=0,02$ (а), $y=0,06$ (б), $y=0,1$ (в)). Выдержка в течение: В – 1 мин., С – 1 час, D – 3 час

Общая картина термоциклирования образца приведена на рис. 8. Показаны граничные кривые изменения содержания кислорода от температуры, а также возможные изотермические переходы от минимального к максимальному значению «медленной» составляющей γ . Следует отметить, что результаты гравиметрических исследований в пределах погрешности эксперимента воспроизводятся при многократном термоциклировании исследуемых образцов.

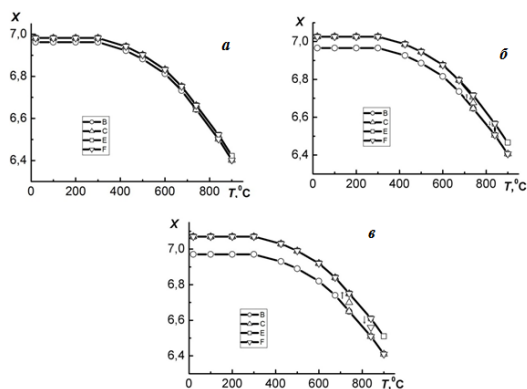


Рис. 8. Общий характер изменения содержания кислорода в образцах $YBa_{2-y}Gd_yCu_3O_x$ ($y=0,02$ (а), $y=0,06$ (б), $y=0,1$ (е)). Охлаждение: В – по «быстрой», С – по «медленной» составляющей. Нагрев: Е – по «быстрой», F – по «медленной» составляющей

Полученные в данной работе результаты свидетельствуют о том, что при температурах ниже 400°C содержание кислорода в образцах не является равновесным, он перестает изменяться при охлаждении, потому что «закаляется» от более высоких температур. В области температур от 400°C до $T_{гр1} = 740^\circ\text{C}$ равновесие отвечает максимальному значению $\gamma = y$. В области температур выше $T_{гр2} = 840^\circ\text{C}$ при равновесии $\gamma = 0$ общее содержание кислорода в купрате можно представить формулой: $x = 6 + \delta$, как в нелегированных образцах. А в интервале $T_{гр1} < T < T_{гр2}$ реализуются

метастабильные состояния, которые зависят от направления изменения термодинамического параметра: $\gamma = y$ при увеличении T от равновесия при $T < T_{гр1}$ и $\gamma = 0$ при понижении T от температур больших, чем $T_{гр2}$.

Поскольку выявленные особенности процесса окисления-восстановления купратов при термоциклировании не были отмечены в образцах состава $YBa_2Cu_3O_x$, но проявляются в образцах, легированных РЗЭ или нестехиометричных по соотношению Y/Ba, естественно связать обнаруженное явление с величиной нестехиометрии или количеством легирующей добавки.

С целью определения влияния катионной и кислородной нестехиометрии на структуру исследуемых образцов по результатам рентгеноструктурного анализа были рассчитаны параметры кристаллической решетки (табл. 1).

Наблюдается постепенное уменьшение параметров элементарной ячейки a , b , c и ее объема с увеличением степени замещения атомов бария атомами РЗЭ. Это связано с меньшими значениями ионных радиусов катионов редкоземельных элементов по сравнению с ионным радиусом Ba^{2+} (табл. 2).

Таблица 1. Влияние катионной нестехиометрии на структурные параметры образцов состава $YBa_{2-y}Nd_yCu_3O_x$

Состав	Параметры кристаллической решетки			
	$a, \text{Å}$	$b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$
$YBa_2Cu_3O_x$	3,830	3,901	11,705	174,88
$YBa_{1,98}Nd_{0,02}Cu_3O_x$	3,831	3,896	11,705	174,72
$YBa_{1,96}Nd_{0,04}Cu_3O_x$	3,828	3,898	11,682	174,30
$YBa_{1,94}Nd_{0,06}Cu_3O_x$	3,827	3,896	11,682	174,16
$YBa_{1,92}Nd_{0,08}Cu_3O_x$	3,825	3,896	11,676	173,99
$YBa_{1,9}Nd_{0,1}Cu_3O_x$	3,825	3,888	11,647	173,21

Таблица 2. Ионные радиусы некоторых редкоземельных элементов по Шеннону [7]

Ионы	Ba^{2+}	Nd^{3+}	Sm^{3+}	Gd^{3+}	Y^{3+}
$r, \text{Å}$	1,420	1,109	1,079	1,053	1,020

По данным рентгеноструктурного анализа были также рассчитаны

параметры кристаллической решетки образца $Y_{1,1}Ba_{1,9}Cu_3O_x$ мак-

симально окисленного ($T = 720^\circ\text{C}$,
выдержка 24 ч) и максимально вос-

становленного ($T = 900^\circ\text{C}$, выдержка
3 ч) (табл. 3).

Таблица 3. Влияние кислородной нестехиометрии на структурные параметры образца состава $\text{Y}_{1,1}\text{Ba}_{1,9}\text{Cu}_3\text{O}_x$

Состав	Параметры кристаллической решетки			
	$a, \text{Å}$	$b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$
$\text{Y}_{1,1}\text{Ba}_{1,9}\text{Cu}_3\text{O}_x (720^\circ\text{C})$	3,834	3,906	11,716	175,45
$\text{Y}_{1,1}\text{Ba}_{1,9}\text{Cu}_3\text{O}_x (900^\circ\text{C})$	3,825	3,896	11,697	174,31

Расчет показал, что в максимально окисленном образце ($\gamma = y$) параметры кристаллических решеток соответственно и объем элементарной ячейки больше, чем в максимально восстановленном образце ($\gamma = 0$) купрата бария-иттрия. Наблюдаемую закономерность можно объяснить тем, что в максимально окисленном образце, в отличие от максимально восстановленного из-за внедрения в базисную плоскость дополнительного количества «медленного» слабосвязанного кислорода увеличивается содержание кислорода в эле-

ментарной ячейке и, соответственно, увеличиваются ее параметры.

Для количественной конкретизации представлений о «медленной» нестехиометрии была также изучена кинетика изотермического окисления и восстановления по «медленной» составляющей кислородной стехиометрии соответственно при $T_{\text{гр}1} = 740^\circ\text{C}$ и $T_{\text{гр}2} = 840^\circ\text{C}$ на исследуемых образцах в виде пластин.

Из известного аналитического решения уравнение диффузии для образца в виде пластины:

$$c(z, \tau) = c_0 \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \sin \left[\frac{(2n+1)\pi z}{\delta} \right] \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D \tau}{\delta^2} \right] \right\}$$

где c — концентрация, моль/см³; c_0 — концентрация диффундирующего компонента на границе раздела фаз, моль/см³ z — расстояние от начала координат (центр пластины) до плоскости определяемой концентрации, см; δ — толщина пластины, см; D — коэффициент диффузии, см²/с; τ — время диффузии, с.

Интегрированием по координате для регулярного режима ($n=0$) диффузии получили следующее кинетическое уравнение:

$$\ln |m_{\text{г}} - m| = \text{const} - \frac{\pi^2 D}{\delta^2} \tau$$

где m и $m_{\text{г}}$ — текущее и конечное значения массы образца соответственно.

Коэффициенты диффузии кислорода D были рассчитаны из наклонов ($\text{tg}\alpha$) прямолинейных кинетиче-

ских зависимостей в координатах $\ln |m_{\text{г}} - m| - \tau$ (рис. 9) по формуле:

$$D = -\text{tg}\alpha \cdot \delta^2 / \pi^2$$

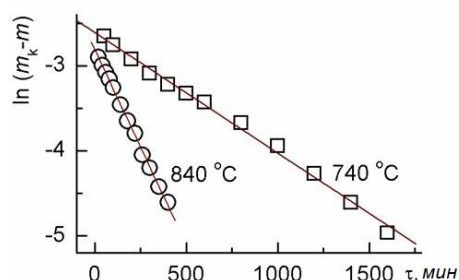


Рис. 9. Кинетика окисления при 740°C и восстановления при 840°C по «медленной» составляющей слабосвязанного кислорода для образца $\text{YBa}_{1,94}\text{Sm}_{0,06}\text{Cu}_3\text{O}_x$

Они оказались значительно меньше, чем известные литературные данные для обычной, «быстрой» состав-

ляющей кислородной стехиометрии нелегированного купрата 123 (табл. 4). Этим еще раз обосновывается название для обнаруженной

нами новой составляющей кислородной нестехиометрии, как «медленная» составляющая.

Таблица 4. Сравнение найденных коэффициентов диффузии D с литературными данными [8]

$T, ^\circ\text{C}$	Коэффициенты диффузии кислорода	
	рассчитанные	по литературным данным
	$D, \text{м}^2/\text{с}$	$D, \text{м}^2/\text{с}$
740	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$1,13 \cdot 10^{-10}$
840	$7,8 \cdot 10^{-12}$	$8,7 \cdot 10^{-11}$

Полученные в данной работе данные подтверждают кристаллохимическую модель внедрения «медленного» слабосвязанного кислорода в базисную плоскость элементарной ячейки купрата, предложенную ранее [9]. Дополнительные атомы слабосвязанного кислорода O_b' в орторомбической структуре купрата бария-иттрия занимают свободные позиции вдоль оси b и блокируют пути легкой диффузии в базисных плоскостях. Это приводит к значительному замедлению диффузии кислорода, что и объясняет появление дополнительной «медленной» составляющей кислородной нестехиометрии.

Таким образом, в образцах купрата бария-иттрия, легированных РЗЭ или нестехиометричных по катионам, выявлено наличие дополнительной составляющей кислородной нестехиометрии, которая отличается от обычно наблюдаемой в сверхпроводниковых купратах скоростью релаксации и возможностью кислородной нестехиометрии с $x > 7,0$. По этим данным вытекает необходимость отличать две составляющих слабосвязанного кислорода в нестехиометричных купратах: обычной «быстрой» δ и дополнительной «медленной» γ (при общем содержании кислорода $x = 6 + \delta + \gamma$).

Список использованной литературы

1. Нелсон Д. Высокотемпературные сверхпроводники / Д. Нелсон; пер. с англ.; под ред. Д. Нелсона, М. Уиттингема, Т. Джорджа. — М.: Мир, 1988. — 400 с.
2. Грабой И.Э. Кислородная стехиометрия высокотемпературных сверхпроводников / И.Э. Грабой, В.И. Путляев // Журн. ВХО им. Д.И.Менделеева. — 1989. — Т. 34, № 4. — С. 473–480.
3. Kishio K. Determination of oxygen nonstoichiometry in a high- T_c superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ / K. Kishio, J. Shimoyama, T. Hasegawa et al. // Jap.J. Appl. Phys. — 1987. — V. 26, № 7. — P. L1228–L1230.
4. Takayama-Muromachi, E. High T_c superconductor $YBa_2Cu_3O_y$ - oxygen vs. T_c relation / E. Takayama-Muromachi, Y. Uchida, M. Ishi et al. // Jap. J. Appl. Phys. — 1987. — V. 6, № 7. — P. 1156–1158.
5. Приседский В.В. Слабосвязанный кислород и сверхпроводимость в $YBa_2Cu_3O_x$ / В.В. Приседский, П.Н. Михеенко, Ю.М. Иванченко, Б.Я. Сухаревский, Г.Е. Шаталова, Л.Г. Гусакова, Е.Н. Малышев, Е.М. Ройзенблат, И.Э. Сухорукова, И.А. Удодов, В.В. Климов // Физика низких температур. — 1989. — Т. 15, № 1. — С. 8.
6. Приседский В.В. Po_2-T фазовая диаграмма купрата бария-иттрия $YBa_2Cu_3O_{9-y}$ / В.В. Приседский, Е.М. Ройзенблат, И.А. Удодов, Л.Г. Гусакова, В.В. Климов // Доклады АН УССР. — 1988. — № 3. — С. 59–62.
7. Shannon, R. D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides / R. D.Shannon // Acta cryst. — 1976. — V. 32. — P. 751–767.

8. Можаяев А.П. Фазовая стабильность и диффузия кислорода в $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ($R=Y, \text{Nd}$) / А.П.Можаяев, Г.Н.Мазо, А.А.Галкин, Н.В. Храмова // Журн. неорганической химии. — 1996. — Т.41, № 6. — С. 916–920.

9. Приседський В.В. Два типи слабо зв'язаного кисню в купраті барію-ітрію, легovanому самарієм / В.В. Приседський, Н.В.Маркова, І.О.Удодов, О.І.Волкова // Вопросы химии и химической технологии. — 2011. — № 5. — С. 396–401.

Надійшла до редколегії 30.01.2012.

© Маркова Н.В., Приседский В.В., 2012

УДК 538.95+945

В.Ф. Русаков¹, В.В. Чабаненко², С.В. Васильев², А. Nabiałek³, Е.И. Кучук²
(¹Донецкий национальный университет, Донецк, Украина, ²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, Донецк, Украина, ³Institute of Physics, Polish Academy of Sciences al. Lotników 32/46, 02-668 Warsaw, Poland)

ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА НИОБИЙ-ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В работе изучены свойства экрана для магнитного поля из ниобий-титанового сплава. Показано, что прозрачность стенки начинается гораздо раньше, чем достигается поле полного проникновения, в поле H_{ps} , при этом индукция внутри экрана начинает медленно возрастать. Несмотря на такую прозрачность, наблюдается дополнительно пять лавин магнитного потока в противоречие модельным представлениям. Количество наблюдаемых лавин в возрастающем поле вдвое меньше, чем в убывающем, что, по-видимому, обусловлено меньшей величиной потока, выходящего в процессе каждой лавины в режиме его захвата.

Ключевые слова: ниобий-титановый сплав, сверхпроводник второго рода, сверхпроводящий экран, намагниченность, термомагнитная неустойчивость, лавина магнитного потока.

В роботі вивчено властивості екрана для магнітного поля з ніобій-титанового сплаву. Показано, що прозорість його стінки починається значно раніше, ніж досягається поле повного проникнення, у полі H_{ps} , при цьому індукція всередині екрану починає повільно зростати. Не зважаючи на таку прозорість, додатково спостерігається п'ять лавин магнітного потоку, у протиріччі з модельними уявленнями. Кількість лавин, що спостерігаються у наростаючому полі вдвічі менша, ніж в убываючому, що, можливо, обумовлено меншою величиною потоку, що виходить у процесі кожної лавини в режимі його захвату.

Ключові слова: ніобій-титановий сплав, надпровідник другого роду, надпровідний екран, намагніченість, термомагнітна нестійкість, лавина магнітного потоку.

Введение

Экранирование внешнего магнитного поля — одно из основных свойств сверхпроводника, наряду с бездиссипативным транспортом электрической энергии. Исследование возможностей экранирования имеет богатую историю, начиная с 60 годов прошлого столетия [1] вплоть до нашего времени [2]. В тоже время ряд важнейших вопросов остался открытым. Например, обнаруженные в 1964 г. неустойчивости потока в сверхпроводящих экранах [1], связанные с термомагнитными лавинами, продолжают в области полей,

где с точки зрения модельных представлений [3] их быть не должно. Это связано со сложностью происходящих процессов, их быстротечностью (тысячные доли секунды), сложностью постановки эксперимента (сильные магнитные поля, высокоразрешающая аппаратура). Мы реализовали комплексный подход к изучению явления проникновения поля в сверхпроводящий экран. Он включает как квазистатические исследования магнитных свойств, так и изучение динамики потока при термомагнитных лавинах. При этом использованы разнообразные датчики с различной